MSAS 系统中国区域航空服务性能分析

邵搏，张键*，熊帅

（中国电子科技集团公司第二十研究所，西安，710068）

摘要：本文在介绍了国际星基增强系统（SBAS）的发展现状的基础上，梳理分析了日本MSAS系统的发展历程与当前服务能力。分析发现，MSAS的服务区域能够对我国东部地区形成覆盖。文中，对 MSAS 电文类型和民航用户定位保护级计算方法阐述后，通过实际飞行试验对其在我国东部区域的实际服务性能进行了评估。评估结果表明，在我国东部地区，MSAS增强定位精度优于LPV-250指标要求（水平16m，垂直20m）；NPA可用性、连续性均达到100%；用户保护级水平满足完好性指标要求。MSAS在我国东部地区有效的增强定位与完好性保障能力，可使地区相关用户依据自身需要使用该服务；同时，MSAS基于其本土有限的监测站就实现了服务区域的扩展，也为我国BDSBAS服务范围的扩展和服务性能的提升提供参考。

关键词：MSAS、服务性能、飞行试验、NPA、LPV-250

中图分类号：TN961　　文献标志码：A

Performance analysis of China regional aviation service of MSAS

SHAO Bo, ZHANG Jian*, XIONG Shuai

(The 20th Research institute of CETC, Xi’an 710068, China)

Abstract: Based on the introduction of the development of the international SBAS, this paper analyzed the development and service performance of MSAS. It is found that the service area of MSAS can cover the eastern region of China. After describing the MSAS message type and the calculation method of civil aviation user positioning and protection level, the actual service performance in the eastern region of China is evaluated through the actual flight test. The evaluation results show that in eastern China, the positioning accuracy of MSAS is better than that of LPV-250 (16m horizontally and 20m vertically); NPA availability and continuity reach 100%; The user protection level meets the integrity requirements. MSAS effectively the positioning and integrity support capability in eastern China, so that relevant users in the region can use the service according to their own needs; At the same time, MSAS has realized the expansion of service area based on its limited local monitoring stations, which also provides a reference for the

expansion of BDSBAS service area and the improvement of service performance in China.

Keywords: MSAS, Service performance, Flight test, NPA, LPV-250

收稿期：
基金项目：陕西省重点研发计划项目（项目编号 2021ZDLGY08-01）；陕西省创新能力支撑计划项目（2021TD-03）；陕西省自然科学基础研究计划项目（项目编号 2021JM-609）；中国电子科技集团有限公司产业发展资金项目（项目编号 20201121）

作者简介：邵搏，男，高级工程师，研究方向：星基增强系统技术研究。
E-mail:night_boris83@163.com
通讯作者：张键，男，工程师，研究方向：GNSS 高精度定位及 SBAS 性能评估的研究。
E-mail:jianzhang_1993@163.com

1 概述

卫星导航系统（GNSS）克服了传统仪表着陆系统（ILS）的不足，实现了全天候、全球范围的高精度连续导航功能。由于使用 GNSS 的定位结果受到多种外部因素的影响，导致定位结果有时并不能真实的反映出飞机当前的真实位置，使得飞机在被引导的过程中会出现完好性风险[1]。

为了满足航空等高生命安全用户对精度和完好性的需要，出现了以 GNSS 为增强对象的星基增强系统（SBAS）。SBAS 通过一定数量的地面监测站对导航卫星进行连续跟踪观测，由主控站对观测数据进行处理后生成相应的差分改正数和完好性参数，并编排成增强电文后通过地球同步卫星（GEO）向服务范围内的用户播发[2]。用户使用增强电文中的差分改正数提升定位精度，利用完好性参数实现服务性能的完好性保证。

目前，正式运行的 SBAS 有美国的广域增强系统（WAAS）[2-4]、欧洲地球同步卫星导航增强服务系统（EGNOS）[5-6]、日本的探路者卫星增强系统（MSAS）[7-8]、印度的 GPS 辅助型静地轨道增强导航系统（GAGAN）[9-10]；处于试运行阶段的 SBAS 有中国的北斗星基增强系统（BDSBAS）[11-13]、俄罗斯的差分改正监测系统（SDCM）[14-15]、非洲及印度洋星基增强系统（A-SBAS）[16-17]；处于建设阶段的 SBAS 有韩国增强卫星系统（KASS）[18]、澳大利亚/新西兰的南部定位增强网（SouthPAN）[19]。国际各国 SBAS 的分布如图 1 所示。

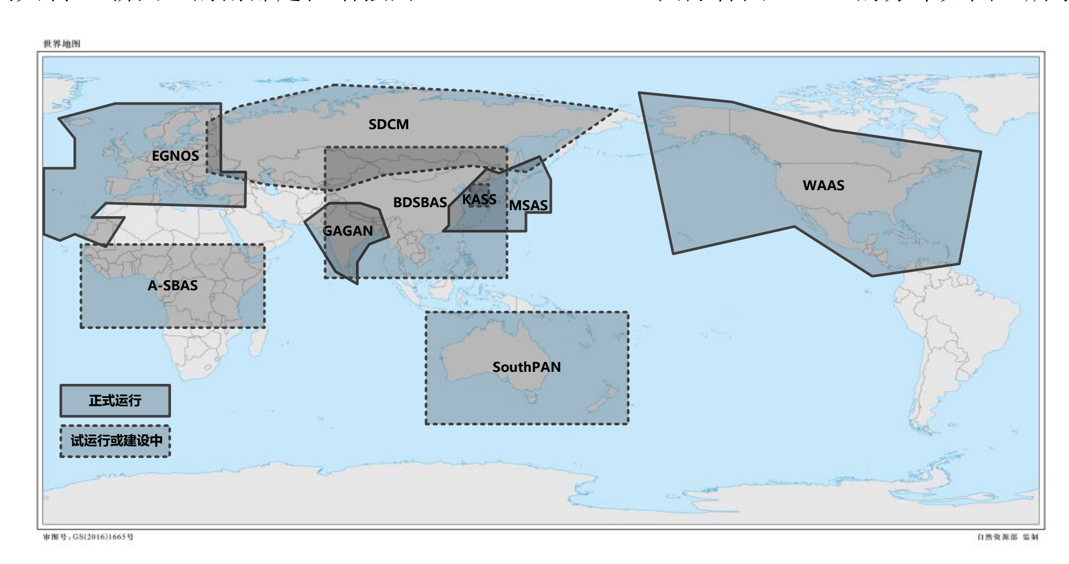


图 1 国际各国 SBAS 分布示意图

Fig 1 SBAS distributions

由图 1 可见，在我国周边正式提供服务的 SBAS 系统主要是日本的 MSAS 和印度的 GAGAN。虽然 GAGAN 系统已于 2015 年 4 月实现了一类垂直引导进近（APV-I）服务[9-10]，但 2019 年后，系统状态未见更新报道。MSAS 却在不断的对系统进行更新升级，持续提升

服务性能。

MSAS 由日本民航局(JCAB)负责建设[2]，第一阶段 MSAS 空间段由日本自主设计的 2 颗 MTSAT GEO 卫星构成，MTSAT-1R（PRN129）位于 140 °E 和 MTSAT-2（PRN137）位于 145 °E。由于技术原因，MTSAT-1R 未能正式运行，日本为了保留 PRN129 的使用权力，通过 MTSAT-2 同时使用 PRN129 和 PRN137 播发服务信号。地面段包括 6 个地面监测站（GMS）分别位于福冈、札幌、东京、那霸、神户和常陆太田，2 个主控站（MCS）分别位于神户和常陆太田，主控站兼具注入功能，神户主控站负责向 PRN129 注入信息，常陆太田主控站负责向 PRN137 注入信息。MSAS 第一阶段于 2007 年 9 月开始运行，提供非精密进近（NPA）服务，已经在日本 51 个机场公布了非精密进近飞行程序，并在 25 架区域运输飞机安装了 MSAS 设备[7]。

随着日本准天顶卫星系统（QZSS）的发展， MSAS 第二阶段将与 QZSS 进行一体化建设，利用 QZSS 系统提供 MSAS 服务[8]。第二阶段 MSAS 空间段由 1 颗 QZS-3 GEO 卫星构成，位于 127 °E 使用 PRN129 和 137 播发增强电文[20]。地面段包括 13 个 GMS 分别位于札幌、仙台、常陆太田、小松、神户、广岛、福冈、系满、种子岛、奄美大岛、石垣岛、宫古岛、父岛，2 个 MCS 分别位于常陆太田和所泽，1 个测试评估中心位于所泽，3 个注入站分别位于常陆太田、种子岛和宫古岛[21]。

自 2020 年 4 月起，MSAS 服务信息的播发通道由 MTSAT-2 卫星调整至 QZSS 的 QZS-3（GEO）卫星，由 QZS-3 同时使用 PRN129 和 137 播发服务信息。目前，JCAB 正在开展决断高度 250 英尺垂直导航信标性能（LPV-250）服务能力的验证工作和决断高度 200 英尺垂直导航信标性能（LPV-200）服务能力的论证工作；MSAS 有望在 2023 年实现垂直导航信标性能（LPV）全阶段服务能力，将服务于全日本的 83 个机场（不包含 2 个军用机场）[22]。

2 MSAS 单频增强电文

MSAS 对 GPS 进行增强，其播发的增强电文类型如表 1 所示：

表 1　MSAS 增强电文类型

Table 1　MSAS Augmentation Message Types

Type	Contents	Type	Contents
1	PRN Mask assignments	17	GEO satellite almanacs
2 to 4	Fast corrections	18	Ionospheric grid point masks
6	Integrity information	25	Long term satellite error corrections
7	Fast correction degradation factor	26	Ionospheric delay corrections
9	GEO navigation message	28	Clock-Ephemeris Covariance Matrix Message
10	Degradation Parameters	63	Null Message

2.1 误差修正

MSAS 增强电文类型 2-4 播发快变改正数 PRC（Pseudo Range Correction）和用户差分距离误差索引（UDREI），用户仅可使用 UDREI<14 的卫星进行定位解算，以保证完好性要求。用户可直接对观测伪距修正如下：

$$PR_{corrected}(t) = PR_{measured}(t) + PRC(t_{of}) + RRC(t_{of}) \times (t - t_{of}) \tag{1}$$

上式中，t 为伪距观测时刻；t_{of}为最近的 PRC 接收时刻；$PR_{corrected}(t)$为经 PRC 修正后的载波相位平滑伪距；$PR_{measured}(t)$为修正前的载波相位平滑伪距；$PRC(t_{of})$为接收的快变改正数；$RRC(t_{of})$为t_{of}时刻用户计算的测距速率改正数（Range-Rate Corrections）。

MSAS 利用电文类型 25 播发慢变改正数，慢变改正数为被增强 GPS 卫星的轨道位置（ECEF 坐标系）改正数和钟差改正数。用户可直接在广播星历解算得到的 GPS 卫星位置与钟差上进行修正，如下：

$$[X \quad Y \quad Z]^T_{corrected} = [X \quad Y \quad Z]^T_{L1C/A} + [\delta X \quad \delta Y \quad \delta Z]^T_{MSAS} \tag{2}$$

上式中，$[X \quad Y \quad Z]^T_{corrected}$为 ECEF 坐标系下经修正后的卫星轨道位置；$[X \quad Y \quad Z]^T_{L1}$为 GPS L1 导航电文解算得到的 ECEF 坐标系下卫星轨道位置；$[\delta X \quad \delta Y \quad \delta Z]^T_{MSAS}$为 MSAS 播发的单频慢变轨道改正数。用户星钟误差修正如下：

$$(\Delta t_{sv})_{corrected} = (\Delta t_{sv})_{L1} + \delta a_{MSAS} - TGD_{L1} + DCB_{p1c1} \tag{3}$$

上式中，$(\Delta t_{sv})_{corrected}$为经修正后的 GPS 卫星钟差；$(\Delta t_{sv})_{L1}$为 GPS L1 导航电文解算得到的卫星钟差；$\delta a_{MSAS}$为 MSAS 单频慢变钟差改正数；$TGD_{L1}$为 GPS L1 导航电文中的 TGD 参数；$DCB_{p1c1}$为 GPS 伪距硬件延迟偏差。

MSAS 通过电文类型 18 播发电离层格网掩码，电文类型 26 播发格网电离层垂直改正数和格网电离层垂直误差因子（GIVEI），用户通过站星位置计算电离层穿刺点（IPP）后，在穿刺点周围搜索电离层格网点（IGP）后内插为用户视线方向电离层延迟。MSAS 播发的 IGP 分布如图 2 所示。

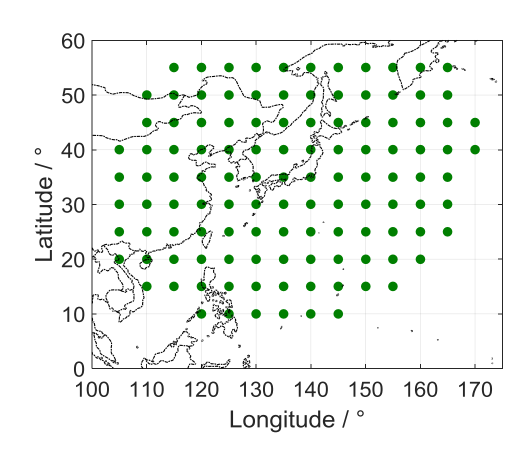


图 2 MSAS 电离层格网点分布图

Fig 2 MSAS IGP distribution map

2.2 定位及保护级解算

在修正过轨道/钟差和电离层误差后，使用加权最小二乘法进行定位解算。观测方程几何矩 G 阵的第 i 行如下：

$$G_i = [-cosEl_i sinAz_i \quad -cosEl_i cosAz_i \quad -sinEl_i \quad 1] \tag{4}$$

上式中，El_i为第 i 颗卫星的高度角；Az_i为第 i 颗卫星的方位角。则用户加权最小二乘解如下：

$$\hat{x} = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot W \cdot y \tag{5}$$

上式中，$\hat{x}$为用户的位置和钟差估计值；y为经修正后的伪距残差值；W为权矩阵，如下：

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_N \end{bmatrix}, \quad w_i = 1/\sigma_i^2 \tag{6}$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \tag{7}$$

上式中，$\sigma_{i,flt}^2$，$\sigma_{i,UIRE}^2$，$\sigma_{i,air}^2$，$\sigma_{i,tropo}^2$可由 MSAS 播发的 UDREI、GIVEI 和空域、时域降效参数等参数计算得到。

投影矩阵 S 如下：

$$S = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot W = \begin{bmatrix} S_{east,1} & S_{east,2} & \cdots & S_{east,N} \\ S_{north,1} & S_{north,2} & \cdots & S_{north,N} \\ S_{U,1} & S_{U,2} & \cdots & S_{U,N} \\ S_{t,1} & S_{t,2} & \cdots & S_{t,N} \end{bmatrix} \tag{8}$$

则有下式：

$$d_{major} = \sqrt{\frac{d_{east}^2+d_{north}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_{east}^2-d_{north}^2}{2}\right)^2 + d_{EN}^2}} \tag{9}$$

上式中，$d_{east}^2 = \sum_{i=1}^{N} s_{east,i}^2 \sigma_i^2$，$d_{north}^2 = \sum_{i=1}^{N} s_{north,i}^2 \sigma_i^2$，$d_{EN}^2 = \sum_{i=1}^{N} s_{east,i} s_{north,i} \sigma_i^2$。

$$d_U = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} s_{U,i}^2 \sigma_i^2} \tag{10}$$

计算得到d_{major}和d_U后，保护级可由下式得到：

$$HPL_{SBAS} = \begin{cases} K_{H,NPA} \cdot d_{major} & \text{en route, LNVA} \\ K_{H,PA} \cdot d_{major} & \text{LNAV/VNAV, LPV, LPV} \end{cases}$$

$$VPL_{SBAS} = K_V \cdot d_U \tag{11}$$

上式中，$K_{H,NPA} = 6.18$，$K_{H,PA} = 6.0$，$K_V = 5.33$。

3 MSAS 服务范围分析

MSAS 的服务群体主要是具有高生命安全需求的民航用户，其服务性能正在从 NPA 向 LPV-250 逐渐过渡。根据国际民航组织标准与建议措施的规定，NPA 服务和 LPV-250 服务的精度、完好性、连续性和可用性的指标要求如表 2 所示[24]。

表 2　NPA 和 LPV-250 服务性能要求

Table 2　NPA and LPV-250 service performance requirements

Service	Accuracy HPE/VPE	Integrity risk	Integrity HAL/VAL	Alarm time	Continuity	Availability
NPA	220 米/--	1×10^{-7}/小时	556 米/--	10 秒	$1\text{-}10^{-4}$ ~$1\text{-}10^{-8}$/小时	0.99~0.99999
LPV-250（APV-I）	16 米/20 米	2×10^{-7}/进近	40 米/50 米	10 秒	$1\text{-}8\times10^{-6}$/15 秒	0.99~0.99999

利用 MSAS PRN137 在 2020 年 9 月 18 日的增强电文，以空间分辨率$1^{\circ}\times1^{\circ}$，时间分辨率 30s，绘制了 MSAS 的 NPA 服务范围和 LPV-250 服务范围，如图 3 所示[25]。

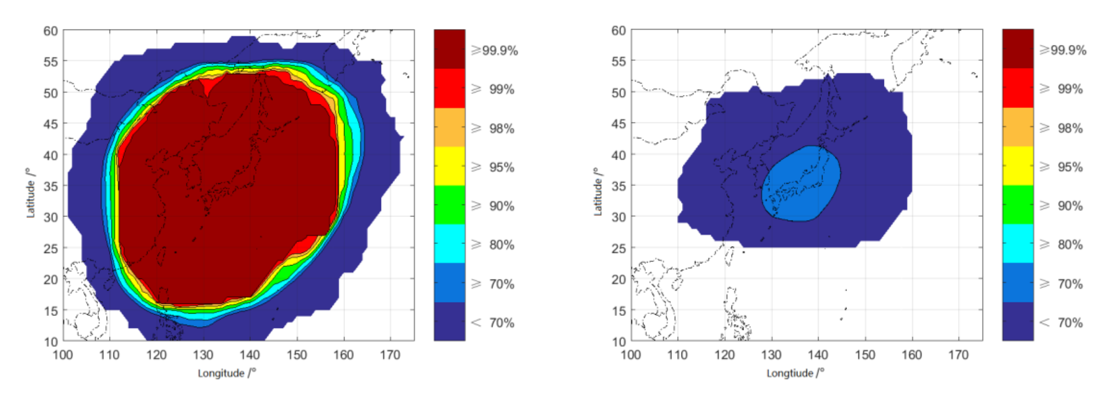


图 3　MSAS NPA（左）和 LPV-250（右）服务覆盖范围

Fig 3　MSAS NPA (left) and LPV-250 (right) service coverage Map

由图 3（左）可见，MSAS 的 NPA 服务已经对日本全境实现了覆盖，与其现在对外宣布的服务能力相匹配。同时，也对我国东部区域形成了覆盖。由图 3（右）所示结果，目前 MSAS 的 LPV-250 服务尚不具备正式服务的能力，与其正在进行 LPV-250 服务验证的工作状态相符合，该服务依然可覆盖我国东部地区，但其可用性低于 70%。

4 服务性能飞行验证

为了进一步分析 MSAS 在我国东部区域的航空服务性能，于 2020 年 9 月 18 日和 9 月 25 日在辽宁省沈阳市法库县财湖机场进行了两次航空飞行试验，分别模拟民用航空飞机在进近阶段与航路阶段的飞行状态。

航空飞行试验使用小型通航飞机。试验中使用两台诺瓦泰接收机，通过后处理 RTK 的方式获得飞机的真实轨迹，其中一台架设在机场附近作为基准站，另一台做为流动站安装在通航飞机上。同时，通航飞机上还安装了一台 Septentrio PolaRx5 接收机，与流动站共用航空天线，采集 GPS 观测数据、GPS 导航电文以及 MSAS 增强电文。

4.1 进近阶段飞行试验

2020 年 9 月 18 日进行的飞行试验持续约 2 小时 15 分钟，通航飞机在机场上方半径 10km 的空域内进行了多次起飞降落、五边飞行和大圆飞行，用来模拟民用航空飞机在进近阶段的飞行状态。进近阶段飞行试验的飞行轨迹如图 4 所示。

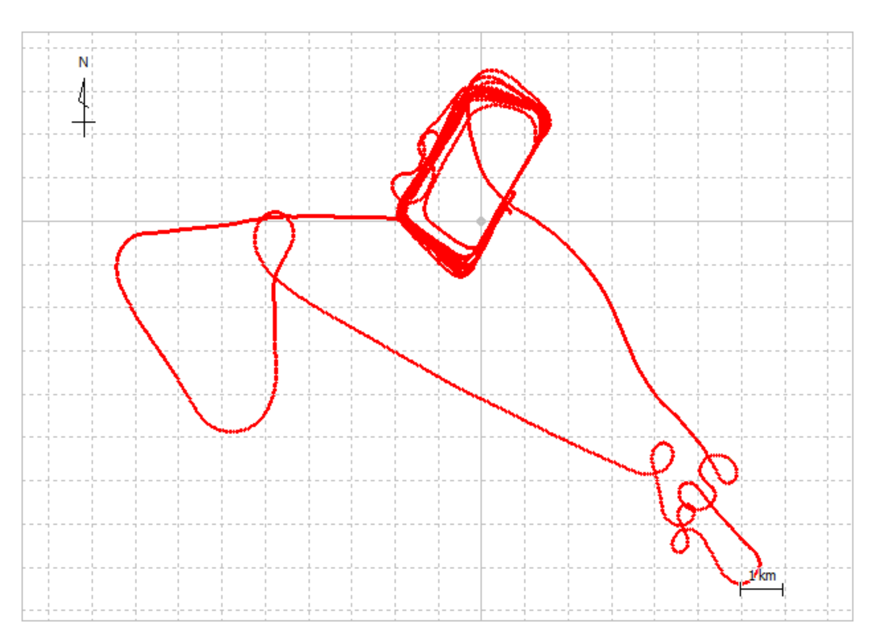
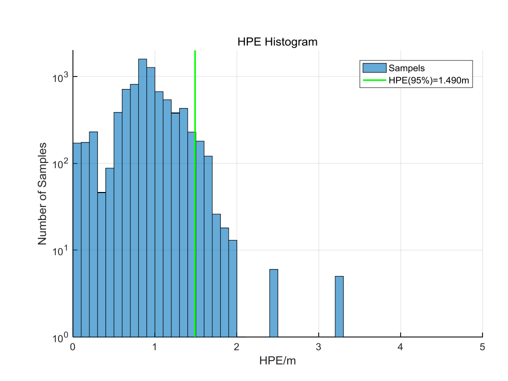


图 4　进近阶段飞行测试飞机航迹图

Fig 4　A map of the aircraft's tracks for the near-stage flight test

4.1.1 定位精度

以第 2 节所述方法进行 MSAS 增强定位解算，将增强结果与后处理 RTK 参考位置比较，对通航飞机在飞行试验过程中的水平、垂直误差分布与 95%分位数进行统计分析，如图 5 所示。



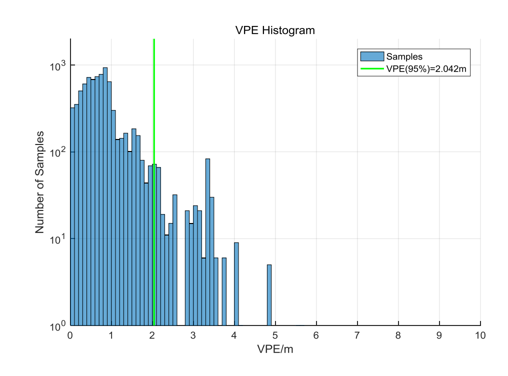


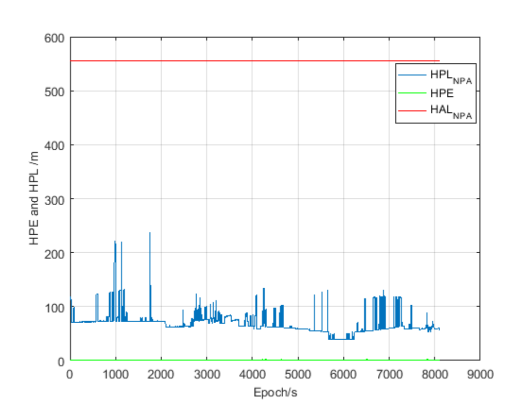
图 5　进近阶段飞行测试 MSAS 单频增强定位水平（左）、垂直（右）误差直方统计图

Fig 5　The MSAS HPE(left) and VPE(right) histogram for flight testing in the near stage

根据误差统计，进近阶段飞行试验中 MSAS 的水平定位精度（95%）为 1.490m，垂直定位精度（95%）为 2.042m，满足表 1 中 NPA 服务和 LPV-250 服务的精度指标要求，表明 MSAS 所播发的慢变/快变改正数在我国东部空域依然具有用户定位增强作用。

4.1.2 完好性

完好性要求保护级能够以一定的概率对定位误差实现包络，在服务层面一般使用完好性事件发生次数来描述[26]。针对 NPA 服务，完好性事件定义为水平定位误差（HPE）大于水平告警门限(HAL)且水平保护级（HPL）小于 HAL 的情况。针对 LPV-250 服务，完好性事件定义为（1）HPE 大于 HAL 且 HPL 小于 HAL；或者（2）垂直定位误差（VPE）大于垂直告警门限(VAL)且垂直保护级（VPL）小于 VAL 的情况。进近阶段飞行试验中定位误差、保护级和告警门限关系如图 6 所示。



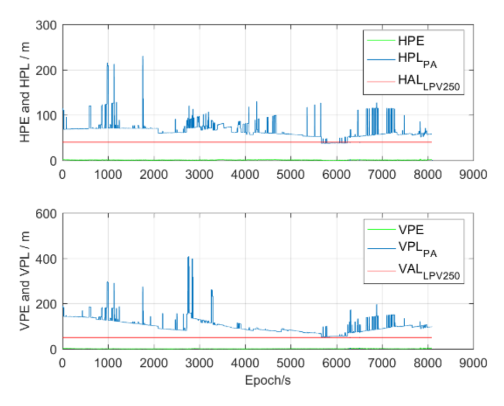


图 6 进近阶段飞行试验中定位误差、保护级和告警门限关系图（左：NPA，右：LPV-250）

Fig 6 PE, PL and AL diagram in the near-stage flight test (left: NPA, right: LPV-250)

由图 6 结果可见，在飞行试验时段内保护级能将相应的定位误差完全包络，完好性风险发生概率为 0，满足表 1 中 NPA 服务和 LPV-250 服务的完好性风险指标要求，表明 MSAS 所播发的完好性参数在我国东部空域内依然可为用户提供完好性保障。

4.1.3 可用性

对于可用性分析，通常将保护级小于告警门限的时间概率视为系统服务的可用性[26]。针对 NPA 服务，当 HPL 小于 HAL 时认为服务可用。针对 LPV-250 服务，当 HPL 小于 HAL 且 VPL 小于 VAL 时认为服务可用。

基于图 6 中的保护级和告警门限对比，进近阶段飞行试验中 NPA 服务可用性和 LPV-250 服务可用性的统计结果分别为 100.000%和 0.000%。NPA 服务的可用性能够满足表 1 中 NPA 服务的可用性指标要求。由于 MSAS 服务目前主要针对 NPA 进行设计，导致完好性参数较为保守，保护级过大，能够对定位误差进行包络但却超过了 LPV-250 服务的告警门限，试验开展时间为当日 7 时 15 分至 9 时 30 分，该时段内计算得到的保护级均大于告警门限，使得 LPV-250 服务可用性不满足指标要求，等于 0.000%。

4.1.4 连续性

对于连续性分析，通常使用 15 秒滑动窗法（如图 7 所示）进行连续性统计[27]。对于某个特定时刻，如果系统服务在当前时刻可用，但在接下来的 15 秒中至少有 1 秒系统服务变为不可用，则认为出现一次连续性事件。连续性为一段时间内样本总数与连续性事件之差除以样本总数。进近阶段飞行试验中 NPA 服务连续性和 LPV-250 服务连续性统计结果如表 2 所示。

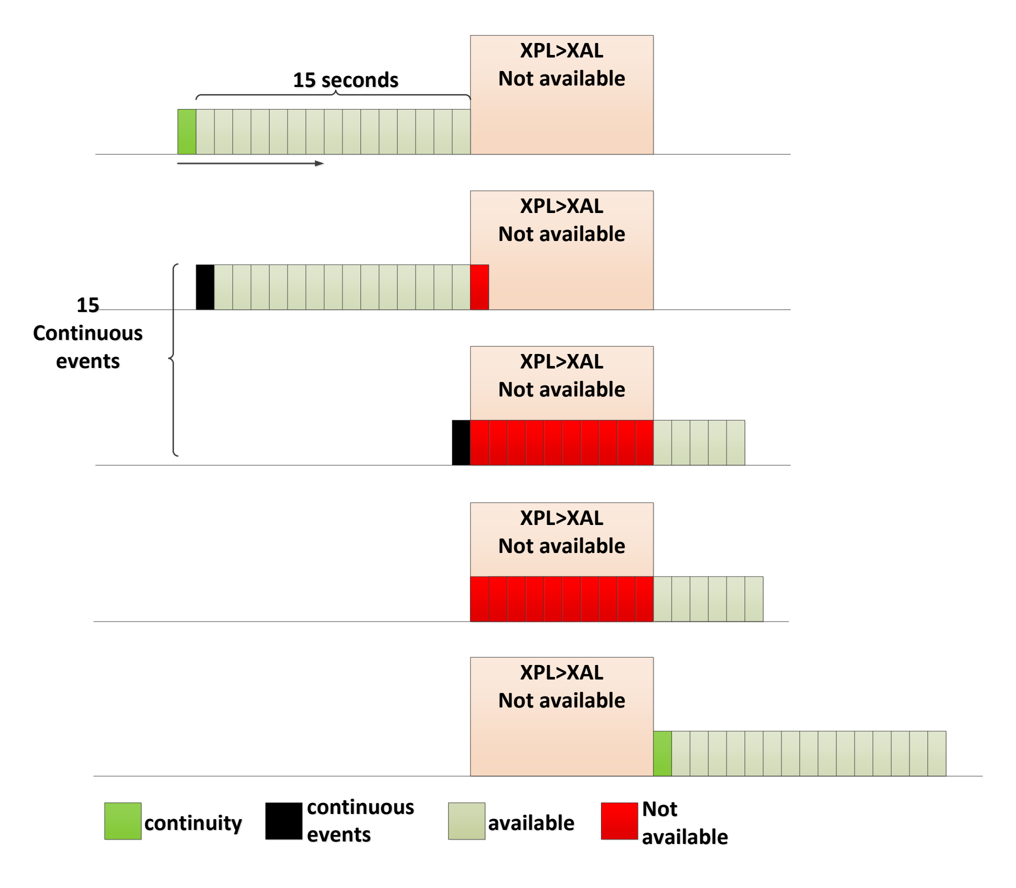


图 7　15 秒滑动窗法示意图

Fig 7　15 second sliding window diagram

SBAS NPA 服务等级连续性要求为 1-10^{-4}~1-10^{-8}/小时，则每小时发生连续性事件的概率为 10^{-4}~10^{-8}，

$$(10^{-4}\sim10^{-8})/3600s=(10^{-4}\sim10^{-8})\times\frac{1}{240}/15s$$

$$\approx(4.17\times10^{-7}\sim4.17\times10^{-11})/15 \qquad (12)$$

则连续性为$(1-4.17\times10^{-7}\sim1-4.17\times10^{-11})/15s$。

基于进近阶段飞行试验中每个时刻保护级和告警门限的对应关系，NPA 服务连续性和 LPV-250 服务连续性的统计结果分别为 100.000%和 0.000%。

从 NPA 连续性指标（1-10^{-4}~1-10^{-8}/小时）和 LPV-250 连续性指标（1-8×10^{-6}/15 秒）中可以看到，要的到准确的连续性评估结果，NPA 的最小样本时长应为$10^4\sim10^8$h，而 LPV-250 的最小样本时长应为 10^6/8×15s≈520.8h。因此虽然上述飞行试验 MSAS NPA 服务连续性达到 100.000%，但仍需进行长期试验以完全验证连续性的正确性。

4.1.5 小结

MSAS 应用于进近阶段的飞行试验服务性能统计如表 3 所示。

表 3　进近阶段飞行试验 MSAS 服务性能统计结果

Table 3 The performance statistics of MSAS service in the near-stage flight test

HPE(95%)/m	VPE(95%)/m	NPA Availability /%	NPA Continuity /%
1.490	2.042	100	100
NPA Integrity event	**LPV-250 Availability /%**	**LPV-250 Continuity /%**	**LPV-250 Integrity event**
0	0.000	0.000	0

从上述统计分析结果可以看到，MSAS 在沈阳试验区域内，其播发的 GPS 卫星轨道/钟差改正数和电离层改正数依然能够实现用户定位精度的提升，使水平/垂直精度满足民航用户 NPA 与 LPV-250 服务等级要求；且其提供的 UDREI、GIVEI、空域降效参数和时域降效参数等完好性信息能够保证计算的保护级将定位误差完全包络，避免完好性事件发生；MSAS 的 NPA 服务在我国东部地区具有应用潜力。

4.2 航路阶段飞行试验

9 月 25 日飞行测试持续约 3 小时 55 分钟，测试主要为转场飞行，飞行从财湖机场起飞，先向西南方向飞约 180km，再向东南方向飞约 180km 到达第二机场，在第二机场不降落，通过场地后原路返回，返回财湖机场后进行大圆飞行降落，以模拟民用航空飞机进航路阶段飞行状态。飞行测试轨迹如图 8 所示。

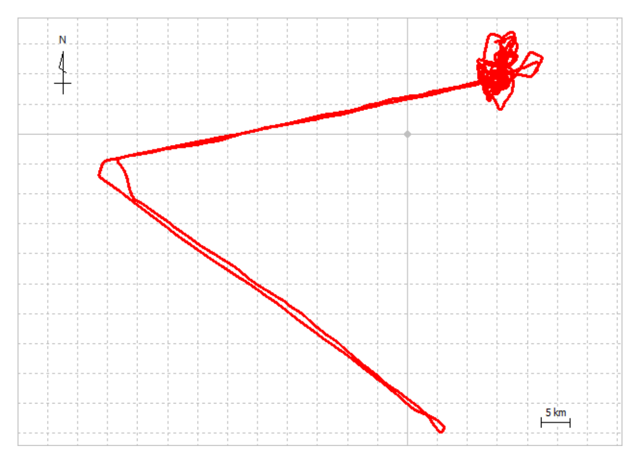
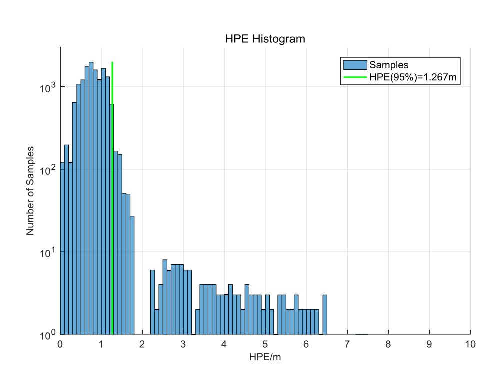


图 8 航路阶段飞行测试飞机航迹图

Fig 8 Flight test aircraft track map of the route stage

采用 MSAS 进行单频增强定位解算，航路阶段飞机定位误差直方统计图、保护级及告警门限分别如图 9 和图 10 所示。



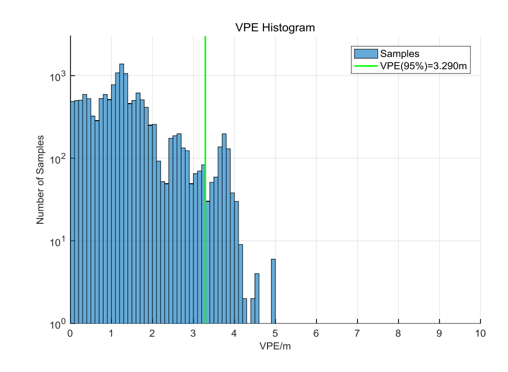
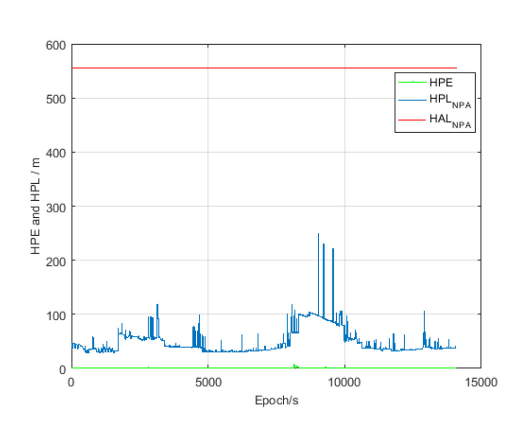


图 9　航路阶段飞行测试 MSAS 单频增强定位水平、垂直误差直方统计图

Fig 9　The MSAS HPE(left) and VPE(right) histogram for flight testing in the route stage



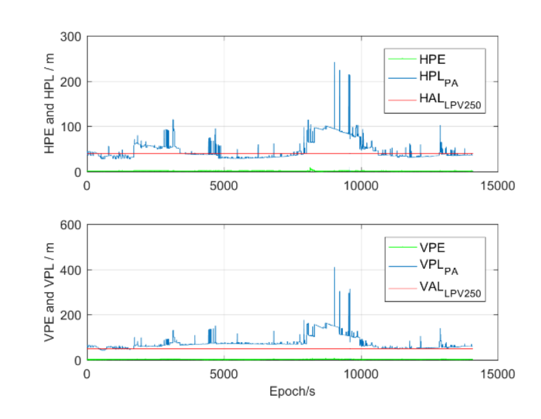


图 10　航路阶段飞行试验中定位误差、保护级和告警门限关系图（左：NPA，右：LPV-250）

Fig 10　PE, PL and AL diagram in the route stage flight test (left: NPA, right: LPV-250)

表 4　航路阶段飞行试验 MSAS 服务性能统计结果

Table 4　The performance statistics of MSAS service in the route stage flight test

HPE(95%)/m	VPE(95%)/m	NPA Availability /%	NPA Continuity /%
1.267	3.290	100.000	100.000
NPA Integrity event	**LPV-250 Availability /%**	**LPV-250 Continuity /%**	**LPV-250 Integrity event**
0	4.964	0.000	0

从图 9、图 10 和表 4 所示结果，航路阶段 MSAS 的服务性能与进近阶段性能基本一致。航路阶段，MSAS 电文播发的快/慢变改正数、电离层改正数、UDREI、GIVEI、空域降效参数和时域降效参数等依然有效，可为民航用户提供定位增强与完好性保障，且满足 NPA 服务指标要求，但不具备 LPV-250 服务能力。

5 总结

本文整体简要介绍了世界范围内 SBAS 系统的发展现状，阐述了日本 MSAS 系统的发展阶段、系统组成及当前应用情况，详细介绍了用户使用 MSAS 单频增强电文实现定位增强和保护级计算方法，并根据实际的飞行试验数据初步测试了 MSAS 在我国东部空域的系

统服务能力。测试结果表明：

（1）MSAS 所提供的服务等级与其官方宣布一致，仅能为民航用户提供 NPA 服务，其 LPV-250 等级服务处于建设阶段；

（2）MSAS NPA 服务能够覆盖我国东部地区，其增强定位精度、可用性、完好性和连续性均满足国际民航组织指标要求，可为我国东部区域民航用户提供 NPA 服务。

对 MSAS 系统的发展历程的总结、测试方法、测试结果的测试经验将有助于我国 BDSBAS 系统的建设和发展，实现 BDSBAS 服务范围的扩展和服务性能的提升；同时 MSAS 在我国东部地区有效的增强定位与完好性保障能力，可使地区相关用户依据自身需要使用其服务。

参考文献

[1] 邵搏. 混合星座导航系统的用户差分距离误差完好性关键技术研究[D]. 北京：北京航空航天大学. 2012.

SHAO Bo. Research on Integrity Key Technology of User Differential Range Error for Mixed Constellation [D]. BeiJing: Beihang University, 2012(in Chinese).

[2] 邵搏，耿永超，丁群，吴显兵. 国际星基增强系统综述[J]. 现代导航，2017，8(3): 157-161.

SHAO Bo, GENG Yongchao, DING Qun, et al. Summarize of International Satellite Based Augmentation System [J]. Modern Navigation, 2017(3):157-161(in Chinese).

[3] JASON B. Wide Area Augmentation System (WAAS) update [R]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016.

[4] Ken Alexander, Don Wilkerson, Jason Burns. Wide Area Augmentation System Update [C]. International Civil Aviation Organization Navigation Systems Panel Joint Working Groups fifth meeting, Montréal, 15-24 October 2019.

[5] European Satellite Services Provider (ESSP). EGNOS performance and LPV implementation status [R]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016.

[6] NATHALIE R. EGNOS programme status [R]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016.

[7] MASASHI G. MSAS status [R]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016.

[8] HIDETSUGU W. MSAS status and future plan [R]. SBAS IWG 35, Australia, 2019.

[9] Airports Authority of India (AAI). GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) [R]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016.

[10] Airports Authority of India (AAI)GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) [R]. SBAS IWG 31, Senegal, 2016.

[11] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系（1.0 版）[S]. 2019 年 12 月.

China Satellite Navigation Office (CSNO). The Application Service Architecture of BeiDou

Navigation Satellite System (Version 1.0) [S]. 2019 Dec (in Chinese).
[12] Civil Aviation Administration of China (CAAC). The new service provider ID and UTC standard ID for BDSBAS [R]. ICAO NSP 4th Meeting, Montreal, Canada, 2017.
[13] LIU Cheng, GAO Weiguang, SHAO Bo, et al. Development of BeiDou satellite-based augmentation system [J]. Navigation, 2021, 68(2): 405-417.
[14] CSNO. SDCM [OL]. http://www.beidou.gov.cn/zy/kpyd/201710/t20171023_4777.html
[15] ESA. SDCM [OL]. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SDCM
[16] ASECNA. SBAS for Africa and Indian Ocean initiative [R]. Twenty-Second Meeting for the AFI Planning and Implementation Regional Group, Ghana, 2019.
[17] ASECNA. Update on “SBAS for Africa and Indian Ocean” (A-SBAS) development [R]. ICAO NSP Sixth Meeting, virtual meeting, 2020.
[18] EUNSUNG L. Korea SBAS program [R]. SBAS IWG 30, Changsha, China, 2016.
[19] Jeffrey Bollard, Simon Reynolds. Southern Positioning Augmentation Network Program Update [R]. ICAO NSP Sixth Meeting, virtual meeting, 2020.
[20] U.S. government .L1 C/A PRN Code Assignments. https://www.gps.gov/technical/prn-codes/L1-CA-PRN-code-assignments-2020-Oct.pdf [OL]
[21] NEC. https://www.nec.com/en/global/solutions/cns-atm/navigation/msas.html [OL].
[22] Kuniyuki Matsuda, Yuto Miyasaka. MSAS Status Update. International Civil Aviation Organization Navigation Systems Panel sixth meeting, 2-13 November 2020.
[23] RTCA DO-229E. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment [S]. December 15, 2016.
[24] ICAO. International Standards and Recommended Practices Annex 10 Aeronautical Telecommunications Volume I. July 2018.
[25] 张键, 邵搏, 熊帅,等. 北斗星基增强系统单频服务区域可用性评估[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3):9.

ZHANG Jian, SHAO Bo, Xiong Shuai, et al. Regional single frequency service availability evaluation of BDSBAS [J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(3):9 (in Chinese).
[26] FAA. Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Analysis Report [R]. 2018.
[27] ESSP. Service Provision Yearly Report (April 2017- March 2018) [R]. 2018.